



Modelling and Simulation of Large-scale Evacuation Process in?Tsunamis

著者	牧野嶋 文泰
number	63
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5653号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00127651

	まきのしま ふみやす
氏 名	牧 野 嶋 文 泰
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成31年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	Modelling and Simulation of Large-scale Evacuation Process in Tsunamis (津波襲来時における大規模避難プロセスのモデリングとシミュレーション)
指 導 教 員	東北大学教授 今村 文彦
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 今村 文彦 東北大学教授 奥村 誠 東北大学教授 寺田 賢二郎

論 文 内 容 要 旨

一般に、津波の発生から、沿岸部への到達、さらに津波による被害が発生する間には、猶予時間がある。多くの津波の発生パターンである地震性の津波の場合には、その猶予時間の間に、地震動などの自然のサインや、早期警報システムからの災害情報、住民間の情報伝達による社会情報といった様々な情報が発信される。また、情報の発信と並行して、多様なバックグラウンドを持つ住民が、その多様な情報を処理し、津波に対応するための多様な行動をとることが知られている。この猶予時間の間の行動によって、津波による人的被害の様相を大きく変えることができるため、将来の津波襲来時の人的被害軽減のためには、津波襲来時の人間行動の特性を理解し、また予測することで、津波発生以前に適切な避難行動・体制を検討しておくことが重要である。本論文は、対象領域が広範囲にわたる、津波襲来時における大規模な避難プロセスのモデリングとシミュレーション方法について検討している。反応段階の行動から避難行動までの、津波襲来時の避難プロセス全体のモデリングを検討している点は、本論文の特色である。本論文の内容は全6章で構成されている。

第1章では、1960年チリ地震津波から2011年東北地方太平洋沖地震津波までの過去の津波イベントにおける既往の調査・研究によって明らかになっている津波襲来時の人間行動について整理し、そのモデリングとシミュレーション方法に関する既往の研究についても整理している。文献レビューに基づき、従来の研究では、主に避難行動の開始判断に着目した研究がされてきており、より多様な避難意思決定のモデル化が必要なことを述べた。また、2011年の東日本大震災で確認されたような、家族を迎えに浸水域内に戻るような複雑な反応行動のモデリングについては、十分に検討されていないことを述べた。さらに、避難行動のシミュレーションについて、従来の多くの研究では、避難者同士のインタラクションを簡素化しており、避難シミュレーションの詳細性や規模性、実際の避難行動への適用性の検討に課題があることを指摘している。

第2章では、既往のエージェントベースドモデルに基づいて、徒歩・車両避難の両方について、個人レベルの避難行動をシミュレートするモデルの構築を試みている。群衆避難行動モデルは、Social Force モデルに基づい

て、異なる属性を持つ個人間のインタラクションによって群衆の行動を予測するモデルを構築した。本研究では、計算効率化を目的として、ポテンシャル法と **Social Force** モデルを組み合わせたモデルを提案している。構築したモデルの性能を確認するために、群衆行動シミュレーションの検証で行われる **Corridor test** や **Bottleneck test** を実施した。**Corridor test** では、本研究のモデルで、よく知られた自己組織化パターンである **Lane formation** を再現できることや、群衆密度増加に伴う移動速度低下を定量的によく再現できることを確認した。特に高密度群衆流の挙動も、実際の歩行者流と整合する結果が得られる特長を確認した。車両避難行動モデルは、**Optimal Velocity** モデルに基づいて、個別の車両の行動をシミュレートするモデルを構築した。開発したモデルによって、実スケールの車両実験を想定した数値実験を実施し、モデルの性能を確認している。数値実験で観察された車両渋滞の伝播速度について、既往の観測データに整合する結果が得られることを確認した。

第3章では、前章で開発したモデルを2011年の東北津波襲来時の宮城県気仙沼市中心部の避難行動に適用することで、避難行動モデルの実避難行動への適用性について検討している。宮城県気仙沼市では、当時の避難行動状況が他地域に比べて詳細に明らかになっており、シミュレーションの実避難行動への適用性を検討することが可能である。詳細な避難モデルを市街地規模の避難行動に適用する際に、その計算コストが課題となるが、本研究では、エージェントベース避難シミュレーションにおける簡便かつ効果的な並列計算手法を提案し、検討に取り入れている。提案した計算手法によって、気仙沼中心市街地の約2.6万人の個人レベルの避難行動のリアルタイムシミュレーションが実行可能なことを確認し、**MPI** と **OpenMP** を組み合わせた並列化の方法が特に有効であることを確認した。震災当時の避難行動を想定した初期条件の下で避難シミュレーションを実施し、避難実態として得られている渋滞路線と計算結果の比較を行った結果、合理的な避難行動を仮定しても、当時の渋滞状況に概ね整合する結果が得られることが分かった。同時に、浸水域内へ向かう車両避難や、遠くの浸水域外へ向かう車両避難を再現できていないことも明らかになり、より精度の高い避難行動予測のためには、合理的な避難意思決定モデルに加えて、より現実的な意思決定モデルが必要であることを述べた。シミュレーションの適用性を確認した上で、対象地域における車両避難リスクに着目し、シミュレーションによる分析を実施した。ここで、車両の分布など避難シミュレーションの初期条件によってリスク評価結果が異なる可能性を指摘したうえで、高速な解析手法を活用した確率論的なリスク評価手法を提案し、リスク評価を実施している。評価の結果、全員が徒歩避難である場合と比較し、検討した人口の約2割程度の適度な車両避難であれば早期避難に有効な避難戦略となる傾向がある一方、検討人口の4割や5割といった多数の住民によって無秩序な車両避難が行われた場合に大きく津波遭遇リスクが上昇する傾向があることが明らかになった。この結果に基づき、震災時の車両避難状況や、将来の津波イベントにおいて住民の避難意向がもつリスクについて議論している。

第4章では、本論文で構築した避難シミュレーションモデルを更に高度化し、都市型津波災害につながる都市規模の津波避難リスクの検討を実施している。本章では、巨大津波による浸水が想定され、津波対策の検討が進められており、東日本の災害対応の重要拠点の一つである神奈川県川崎市沿岸部を対象として、都市型津波災害

につながる避難リスクの分析を実施した。対象とした避難人口は、約 34 万人であり、詳細に津波避難リスクを分析する検討では既往最大クラスの検討規模である。検討に際して、これまでの計算方法では、対象とする人口規模の解析が難しいことを指摘し、データ構造の改善による通信レイテンシの低減や、より効率的な近傍避難者探索手法の導入を試みている。約 34 万人の詳細かつ大規模な避難シミュレーションを、改善した解析手法とスーパーコンピュータ FX100 を用いることで実施し、解析を現実的な時間内で完了できることが分かった。さらに数千の CPU コアを用いることで、計算再現時間よりも早く解析を終了できることを示した。大規模シミュレーションによる解析の結果、都市部の人口密集地域では、徒歩避難であっても、避難所に向かう避難路で、避難者が集中することで混雑が発生し、避難完了に遅れが生じることが分かった。また、想定人口の全員が避難した場合、一部の避難所では、深刻な混雑状況が発生することが示唆された。高度に都市化した地域での津波被災経験はこれまでにないことや、都市部では、大規模な避難訓練の実施も難しいことから、本研究で実施したシミュレーションは、都市部の潜在的な津波避難リスクの発見に有用であると考えられる。また、本検討で特定された都市域特有の避難リスクの低減方法として、近年活用が期待されているリアルタイム津波浸水予測を用いた避難制御についても新たに提案し、その効果を数値実験によって調べた。本検討では、津波到達前に正確な浸水予測が得られると仮定し、初期位置が浸水域内となる住民のみが避難行動を実施する避難制御を実施した。その結果、提案した避難制御によって避難制御がない場合に確認された混雑状況が大きく改善されることを確認した。リアルタイム予測における情報の精度と時間のトレードオフに着目し、異なる避難開始傾向で津波暴露の有無を調べたところ、対象とした慶長型地震津波については、約 40 分程度の情報配信・避難開始のための猶予時間が認められ、避難制御の有効性が確認できた。ただし、都市部の複雑な環境のモデリングなどに課題があり、今後、結果の更なる検証は必要である。

第 5 章では、2011 年の津波の際に得られた実際の住民の避難行動データに基づき、現実的な避難意思決定モデルの構築や、住民の反応段階の行動も含めた避難プロセスのモデル化の可能性について検討した。本研究では、避難手段の選択に着目し、2013 年に宮城県気仙沼市で実施された住民アンケート調査の結果から、避難手段選択モデルの構築を試みている。徒歩・車両避難手段の選択を 2 項ロジットモデルでモデル化し、アンケート調査の結果からモデルパラメータを推定した。その結果、性別や年齢といった個人属性や、避難先の種別、避難開始のタイミングといった避難要因が避難手段選択に影響を及ぼすことが分かった。最も支配的な説明変数は避難距離であった。構築したモデルで、K-fold cross-validation を実施し、構築したモデルによって、アンケート調査で得られた避難手段選択をよく説明できることを確認した。本章では更に、検討の範囲を避難行動に先立って観察される反応行動にも広げ、津波避難プロセス全体のモデル化可能性についても調べた。宮城県石巻市南浜町で、震災当時津波を経験した住民を対象に実施された詳細なインタビュー調査の結果をもとに、住民の避難プロセスのモデル化の可能性について検討した。本研究では、避難プロセスをコード化された訪問場所カテゴリーのチェーンであらわされる文字列として表現し、編集距離を用いて、その類似度を評価することで、避難プロセスの

類型化を行う方法を提案している。当時の住民の行動に基づき 8 つの位置カテゴリで避難プロセスを表現することで、住民の避難プロセス間の類似度を定量的に表現した。更に類似度に基づきクラスタ分析を実施することで、8 つの避難プロセスカテゴリを特定した。複雑でモデル化が困難と思われていた住民の避難プロセスも一定の類似度を持ち、モデル化できる可能性があることを示した。

第 6 章では、本論文のまとめと将来の展望について述べている。津波避難リスクの検討には広域かつ、多様で大規模な行動を、詳細に検討する必要があるものの、本論文では、近年のシミュレーション手法と並列計算の活用によって、これが実現できることを示した。より現実的かつ、多様な避難リスクを想定するためには、現実的な避難者モデルや、反応行動のモデル化が欠かせないが、豊富なデータがあれば、これらもモデル化できる可能性があることを示した。住民の避難行動データ不足の課題については、日常と災害時の人間の判断の差異を明らかにし、今後豊富に得られるようになる日常のデータを活用する可能性を議論した。現実的な避難者モデルと高性能シミュレーションを組み合わせることで、より多様なリスク評価が可能になることや、新たな災害対応技術創出につながる可能性を述べた。

論文審査結果の要旨

巨大津波襲来時に人的被害を最小化するためには、平時から将来の津波を想定した津波避難における潜在的な課題を発見し、解決のために適切な避難体制を整備することが必要不可欠である。本研究は、こうした将来のより適切な津波避難に資する、津波襲来時における大規模避難プロセスのモデリングとシミュレーション手法の開発を行った。

第1章は、序論である。

第2章では、徒歩・車両避難の両方について、個人レベルの避難行動を予測するモデルを構築した。また、種々の条件下での数値実験を通して、構築したモデルが実際の群衆や車両の挙動を十分な精度で再現できることを示した。

第3章では2011年東日本大震災時の宮城県気仙沼市中心部における避難行動に適用することで、避難行動モデルの実避難行動への適用性について検討した。簡便かつ効果的な並列計算方法を提案し、当時の避難行動を想定した詳細性と信頼性の高い避難シミュレーションを提案できた。また、車避難のリスク評価を行い、利用率の違いによる渋滞状況を予測することで対象地域の今後の津波避難計画に有用な示唆を与えている。

第4章では、避難シミュレーションを大規模化し、都市規模の津波避難リスクの検討を実施している。効率的な計算方法とスパコンの活用により、首都圏臨海部の約34万人の大規模かつ詳細な避難行動の検討に成功した。都市域特有の潜在的な避難リスクを明らかにするとともに、リアルタイム津波浸水予測を活用したリスク低減手法を提案しその効果を検討できた。

第5章では、東日本大震災での実避難行動データを基に、避難手段選択の意思決定モデルの構築や、反応行動を含めた避難プロセス全体のモデル化の可能性について検討した。統計的な手法によって、現実的な避難者の行動がモデリングできる可能性を示している。

第6章では、本論文で得られた結果を整理し、結論を述べるとともに、今後の研究の展望を示している。

以上のように、本論文は、避難シミュレーションの詳細化や大規模化を図り、その適用範囲を広げたほか、実際の避難行動データに基づいた、より現実的な避難シミュレーションの実施可能性を示している。そのため、津波工学のみならず、災害科学、防災・減災学などの学問分野にも発展へ大きく寄与するものと期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。